

Топологии резонаторов волоконных лазеров с синхронизацией мод излучения: возможности и перспективы

Б.Н.Нюшков, С.М.Кобцев

Впервые представлены результаты сравнительного анализа топологий резонаторов волоконных лазеров с синхронизацией мод излучения. Показано, что применение различных топологий и преимуществ волоконных технологий позволяют реализовать заданные комбинации дисперсионных, нелинейных, поляризационных и других свойств волоконных резонаторов, сложно реализуемых или нереализуемых методами традиционной дискретной лазерной оптики. Результаты работы позволяют рассматривать топологический инжиниринг волоконных лазеров с синхронизацией мод излучения в качестве новой, быстро развивающейся области исследований и разработок.

Ключевые слова: синхронизация мод, волоконные лазеры, технология резонаторов.

1. Введение

Волоконные лазерные технологии предоставляют новые уникальные возможности для конфигурирования лазерных резонаторов. Наиболее ярко эти возможности реализуются в короткоимпульсных волоконных лазерах, резонаторы которых конфигурируются определённым образом для обеспечения заданных нелинейных, дисперсионных, поляризационных и других свойств, необходимых для надёжной синхронизации мод излучения [1–5]. Бурно развивающиеся волоконные технологии конструирования резонаторов волоконных лазеров [6–10] в определённой степени подобны современным конструкторам для сборки и моделирования разнообразных объектов: различные волоконные элементы со стандартными разъёмами или без разъёмов, но способные быть соединёнными с помощью специального оборудования, соединяются в определённой последовательности, часто образуя конфигурации, которые сложно реализовать на базе дискретной оптики – в традиционных твердотельных и других лазерах.

Во многом широкие возможности лазерного волоконного конструктора обусловлены относительно высоким усилением волоконной активной среды, компенсирующим потери излучения как в элементах резонатора, так и в местах сварки оптических волокон. Если в обычных дискретных резонаторах короткоимпульсных твердотельных лазеров потери излучения на уровне 20%–30% и более могут быть недопустимы либо из-за превышения потерь над усилением, либо из-за недостаточной для пассивной синхронизации мод внутрирезонаторной мощно-

сти генерации, то для многих волоконных резонаторов потери такого уровня не являются критическими при импульсной генерации. Меньшая чувствительность волоконных лазерных резонаторов к потерям излучения делает возможной более широкую реализацию новых уникальных схем лазерных резонаторов и порождает новое направление исследований и разработок волоконных лазеров, связанное с топологией их резонаторов.

Как показывают многочисленные исследования последних лет, топология резонатора волоконного лазера с синхронизацией мод излучения (ВЛСМИ) способна существенно образом влиять на свойства лазерной генерации, а в ряде реализаций и задавать их. Таким образом, топология резонатора ВЛСМИ является важным фактором, определяющим свойства лазерной генерации. Ранее уже отмечалось, что последовательность оптических элементов в резонаторе ВЛСМИ оказывает заметное влияние на параметры генерируемых импульсов [11]. Однако многие новейшие резонаторы ВЛСМИ являются существенно более сложными по сравнению с традиционными линейными или кольцевыми схемами резонаторов, и в этих более сложных резонаторах параметры генерируемых импульсов зависят не только от последовательности оптических элементов, но и от геометрико-топологической структуры резонатора, задающей в том числе и нетривиальное пространственное распределение характеристик резонатора – нелинейных, дисперсионных, поляризационных и других. Анализ ключевых современных геометрико-топологических структур резонаторов ВЛСМИ до сих пор не проводился, и настоящая работа восполняет этот пробел.

2. Модификации цельноволокновой кольцевой топологии резонатора

Кольцевой резонатор наиболее часто используется в качестве основы конструкций различных ВЛСМИ. Основным достоинством кольцевой схемы является отсутствие необходимости использования зеркал резонатора, при этом вывод излучения из резонатора осуществляется через волоконный ответвитель. Волоконные лазеры с ли-

Б.Н.Нюшков. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 15Б; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: nyushkov@laser.nsc.ru, borisn@ngs.ru

С.М.Кобцев. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: kobtsev@lab.nsu.ru

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г.

нейными резонаторами также способны обеспечить высокое качество синхронизации мод излучения [12–14], однако линейные схемы таких лазеров требуют использования концевых широкополосных зеркал, которые в волоконном исполнении остаются пока относительно сложными и дорогостоящими, – как в случае использования фарадеевских зеркал [15] и чирпированных брэгговских отражателей [16], так и в случае применения петлевых отражателей на основе волоконных циркуляторов [17] или нелинейных петлевых зеркал [18]. В связи с этим кольцевые волоконные резонаторы получили наибольшее распространение, и большинство топологий резонаторов современных ВЛСМИ является развитием традиционной классической кольцевой схемы. Пассивная синхронизация мод в волоконных лазерах реализуется за счёт использования либо реальных насыщающихся поглотителей [19–21], либо так называемых искусственных насыщающихся поглотителей – дискриминаторов интенсивности на основе оптической нелинейности в волокнах [22–24].

В типичных кольцевых эрбиевых волоконных лазерах ($\lambda \approx 1.5$ мкм) на основе обычных одномодовых волокон, в зависимости от способа пассивной синхронизации мод, дисперсионной карты резонатора и ширины рабочей спектральной полосы внутрирезонаторных элементов, генерируются ультракороткие импульсы с длительностью от единиц пикосекунд [25] до суб-100 фс [26]. В условиях преимущественно аномальной внутрирезонаторной дисперсии типичных эрбиевых лазеров энергия генерируемых импульсов обычно составляет менее 1 нДж. В цельноволоконных кольцевых итербиевых лазерах ($\lambda \approx 1.1$ мкм) при синхронизации мод в условиях полностью нормальной внутрирезонаторной дисперсии и спектрально-ограниченного усиления генерируются так называемые диссипативные солитоны [2], которые в определённых условиях могут быть сжаты с помощью внешнего компрессора до предельных значений, лежащих в диапазоне суб-100 фс [27, 28].

Тот факт, что при синхронизации мод в условиях полностью нормальной внутрирезонаторной дисперсии импульс может циркулировать в резонаторе, не разрушаясь даже при наборе большого нелинейного фазового набег ($\Phi_{nl} \gg \pi$) [29], открыл возможности для масштабирования энергии импульсов. Некоторые работы в этом направлении основывались на увеличении внутрирезонаторной мощности за счёт применения активных волокон с двойной оболочкой и мощной накачки [28]. Однако более интересным подходом, задавшим новое перспективное направление совершенствования и развития топологий ВЛСМИ, стало масштабирование энергии импульсов за счёт увеличения длины резонатора. Данная концепция основывается на том факте, что увеличение длины резонатора ВЛСМИ приводит к уменьшению фундаментальной частоты следования импульсов и к пропорциональному увеличению их энергии при неизменной средней мощности излучения (или неизменной мощности излучения накачки). Впечатляющие результаты масштабирования энергии импульсов до уровня единиц микроджоулей непосредственно в задающем волоконном генераторе за счёт применения сверхдлинного (2.6 км) резонатора были впервые получены в итербиевом волоконном лазере [30] с гибридной волоконно-дискретной конструкцией резонатора. Вскоре подобный подход был успешно применён и в цельноволоконном эрбиевом лазере с резонатором

километровой длины [31]. После первых демонстраций сверхдлинных ВЛСМИ последовало множество теоретических и экспериментальных исследований лазеров данного типа с достижением рекордной на сегодняшний день энергии импульсов 12 мкДж [32] непосредственно на выходе ВЛСМИ.

Конечная идея этого подхода состоит в том, чтобы за счёт увеличения длины волоконного резонатора с нормальной дисперсией получить высокоэнергетические сильночирпированные импульсы, а затем сжать их и получить одновременно высокую энергию импульсов и их относительно малую длительность. На практике получение в сверхдлинном волоконном резонаторе хорошо сжимаемых импульсов не всегда гарантировано, т.к. с ростом длины резонатора среди возможных режимов генерации [33] более стабильным является режим генерации слабо сжимаемых двухмасштабных импульсов [34]. До настоящего времени продемонстрирована возможность эффективного (~ 100 -кратного) сжатия одномасштабных когерентных импульсов, сформированных в резонаторе длиной только около 1 км [35], тогда как синхронизация мод реализована в резонаторах длиной до 25 км [36]. Для получения в ультрадлинных резонаторах хорошо сжимаемых высокоэнергетических импульсов требуется, в частности, разработка более совершенных топологий резонаторов.

Другой важной проблемой подхода, основанного на существенном увеличении длины резонатора ВЛСМИ, является ухудшение стабильности параметров генерации из-за увеличения его чувствительности к факторам внешней среды (вибрациям, перепадам температуры и давления). В первую очередь это может проявляться в значительной поляризационной нестабильности излучения. Для решения этой проблемы возможно использование специальных волокон с сохранением поляризации излучения, что сопряжено, однако, с рядом других проблем: во-первых, такие волокна существенно дороже обычных одномодовых волокон, во-вторых, они обладают много большими оптическими потерями и, в-третьих, выбор коммерчески доступных волокон с сохранением поляризации относительно невелик, соответственно ограничен выбор дисперсионных характеристик этих волокон, хотя они особенно важны при создании эрбиевых ВЛСМИ. Тем не менее недавно была продемонстрирована оригинальная модификация кольцевой топологии резонатора для сверхдлинного ВЛСМИ на основе волокон с сохранением поляризации [37]. Предложенная Θ -образная конфигурация волоконного лазера, схематично изображённая на рис. 1, а, позволяет экономно использовать волокно с сохранением поляризации за счёт двойного прохода излучения через верхнюю петлю резонатора в одном цикле полного обхода резонатора.

Другое топологическое решение проблемы поляризационной нестабильности излучения в сверхдлинных ВЛСМИ состоит в использовании комбинированной линейно-кольцевой схемы резонатора, в которой к относительно короткому кольцевому резонатору посредством циркулятора присоединяется сверхдлинное линейное плечо, оканчивающееся фарадеевским зеркалом (рис. 1, б). Последнее полностью компенсирует линейное двулучепреломление (а значит, и его флуктуации) в линейном плече. Такой подход был успешно апробирован в работах [31, 38]. Дополнительным преимуществом такой топологии резонатора сверхдлинного ВЛСМИ является

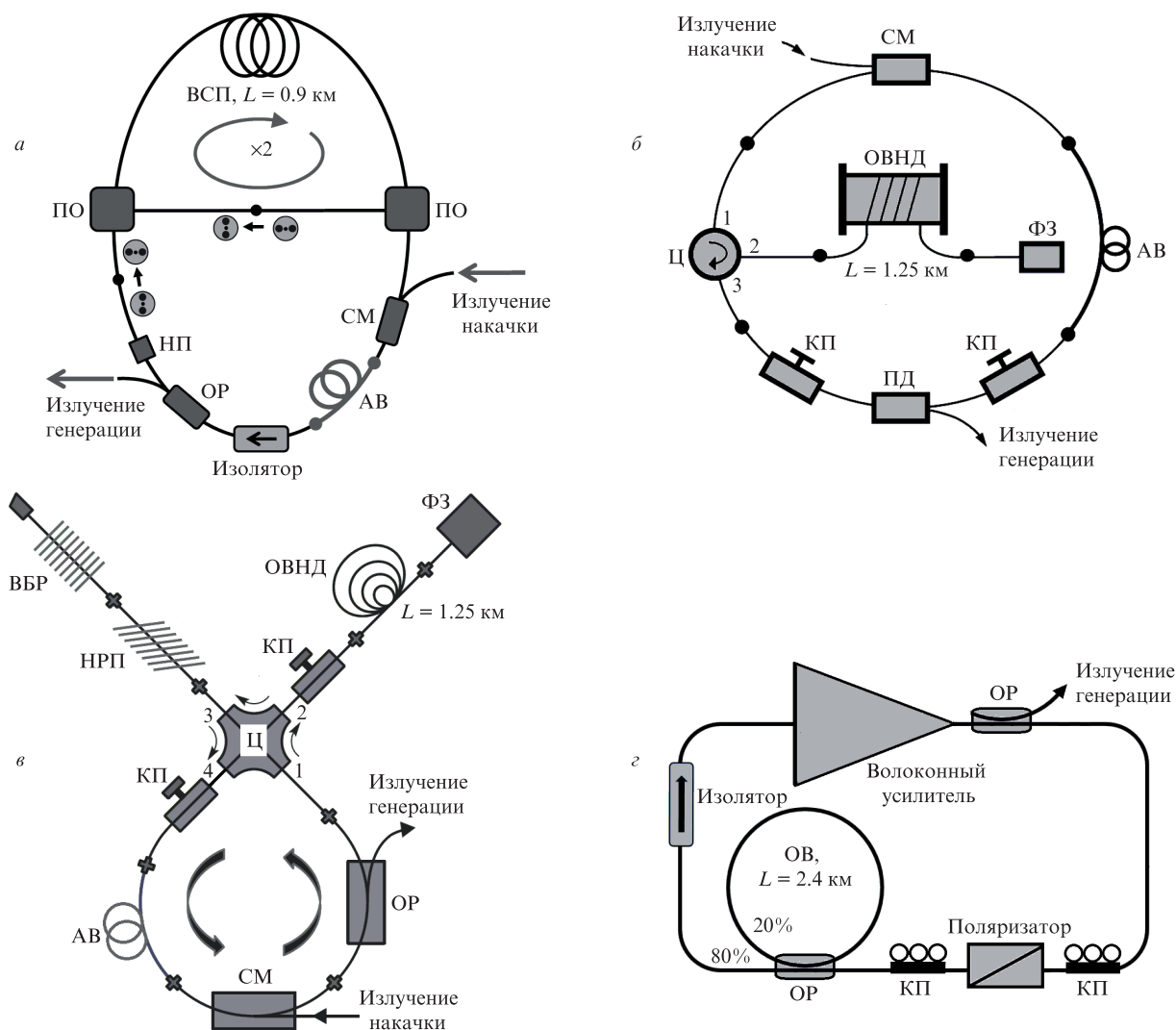


Рис.1. Схемы сверхдлинных ВЛСМИ с различными топологиями резонаторов: *a* – Θ -резонатор [37]; *b* – линейно-кольцевой резонатор [31, 38]; *в* – γ -резонатор [39]; *г* – связанный двухкольцевой резонатор [40]. Обозначения: ВСП – волокно, сохраняющее поляризацию, ПО – поляризационный объединитель, НП – насыщающийся поглотитель, ОР – оптический разветвитель, АВ – активное волокно, СМ – спектральный мультиплексор, ВБР – волоконная брэгговская решетка, НРП – наклонная решетка показателя преломления, Ц – циркулятор, КП – контроллер поляризации, ОВНД – одномодовое волокно с нормальной дисперсией, ФЗ – фарадеевское зеркало, ПД – поляризационный делитель, ОВ – одномодовое волокно.

двойной проход излучения через линейное плечо резонатора, что важно при использовании в линейном плече специального волокна, например волокна с заданными дисперсионными характеристиками.

Дальнейшее развитие линейно-кольцевая топология резонатора получила в работе [39], в которой впервые был реализован сверхдлинный ВЛСМИ с γ -образной конфигурацией резонатора (рис.1,в). В этом лазере также впервые использовалось сочетание различных типов волоконных решёток показателя преломления. Дополнительное линейное плечо с фильтром на основе волоконной брэгговской решётки позволило оптимизировать режим синхронизации мод в γ -лазере, достичь устойчивой генерации высокоэнергетических импульсов, имеющих характерные свойства диссипативных солитонов, минимизировать вклад спонтанной эмиссии в выходное излучение.

Отдельного упоминания заслуживает недавно реализованная оригинальная двухкольцевая топология резонатора (рис.1,г) для сверхдлинных ВЛСМИ с высокой энергией импульсов [40]. В таком лазере реализуется гибри-

дный режим генерации: синхронизация импульсов происходит за счёт дополнительного (пассивного) кольца обратной оптической связи, задержка в котором совпадает с периодом следования импульсов, изначально возникающих благодаря модуляции добротности в основном (усиливающем) кольце резонатора. Получены импульсы с энергией до 4.5 мкДж.

Параллельно с разработкой модифицированных топологий проводились исследования, связанные с более тонкой оптимизацией собственно кольцевой топологии резонаторов ВЛСМИ, предназначенных для генерации высокоэнергетических импульсов. Актуальной проблемой при реализации пассивной синхронизации мод при большой внутрирезонаторной мощности может являться так называемая перегрузка (*overdriving*) применяемого механизма синхронизации мод. Это означает, что при превышении определенного уровня интенсивности излучения функция пропускания искусственного насыщающегося поглотителя перестает быть монотонно зависящей от мгновенного значения интенсивности излучения. В большой мере это проблема может проявляться в ла-

рах с синхронизацией мод на основе эффекта нелинейной эволюции поляризации излучения (НЭПИ) [22] и являться одной из причин формирования так называемых двухмасштабных импульсов [33, 34]. Возможный способ оптимизации кольцевой топологии резонатора ВЛСМИ для решения этой проблемы, а также проблемы возникновения паразитного ВКР демонстрируется в работах [41, 42]. Суть подхода заключается в компоновке резонатора из короткого отрезка одномодового волокна (для оптимального НЭПИ) и длинного отрезка волокна, сохраняющего поляризацию (для масштабирования энергии импульсов). Кроме того, недавно была продемонстрирована возможность синхронизации мод на основе эффекта НЭПИ в кольцевом резонаторе, полностью скомпонованном из сохраняющих поляризацию волокон [43]. В таком резонаторе медленные оси последовательно соединенных отрезков двулучепреломляющего волокна ориентированы под определёнными углами друг к другу. Это позволяет использовать НЭПИ и компенсировать негативное влияние линейного двулучепреломления на ультракороткий импульс. Дальнейшим развитием данного подхода является топология, сочетающая неколлинеарную ориентацию медленных осей последовательных сегментов двулучепреломляющего волокна с использованием фарадеевского зеркала [44, 45].

3. Топологии резонаторов с возможностью контроля и стабилизации частотно-временных характеристик ВЛСМИ

Рассмотренные выше модификации кольцевой топологии резонаторов предназначены главным образом для генерации импульсов с относительно большой энергией и невысокой частотой следования. Лазеры с такими параметрами могут применяться для прецизионной обработки искусственных материалов и биологических тканей, для лидарных измерений и дальней оптической связи через атмосферу Земли. В то же время для решения целого ряда других задач, например связанных с современными методами частотно-временной метрологии [46, 47], нужны высокостабильные источники ультракоротких световых импульсов, принципиальные требования к которым не связаны исключительно с высокой энергией в импульсе. Для этих задач необходимы фемтосекундные волоконные лазеры с возможностью плавной перестройки и динамической регулировки частотно-временных характеристик излучения (например, частоты следования импульсов, центральной длины волны генерации). Так, для создания высокостабильных гребенок оптических частот [5, 48] или оптических синтезаторов частот [49], являющихся основой оптических часов, предпочтительны фемтосекундные источники с высокой частотой следования импульсов (не менее 100 МГц) и как можно меньшей длительностью (в диапазоне суб-100 фс). Топология резонаторов таких лазеров должна обеспечивать возможность эффективной автоподстройки оптической длины резонатора для стабилизации межмодовой частоты излучения (частоты следования импульсов), а также возможность управления внутррезонаторной дисперсией и, тем самым, частотой смещения генерируемой гребенки оптических частот.

Долгое время при создании высокостабильных эрбиевых ВЛСМИ метрологического назначения использова-

лись как простые кольцевые резонаторы регулируемой длины [50], так и получившие большее предпочтение (в частности в коммерческих системах) σ -резонаторы, подобные изображенному на рис.2,*a* [51]. Линейно-кольцевая волоконно-дискретная топология такого резонатора основывается на использовании поляризационного делительного кубика, обеспечивающего связь волоконной кольцевой части резонатора с коротким линейным плечом, состоящим из дискретной оптики. Поляризационный кубик также играет роль поляризационного дискриминатора, необходимого для поддержания режима синхронизации мод за счёт эффекта НЭПИ. Подобная топология резонатора сохраняет некоторые достоинства кольцевой топологии, обеспечивает высокую фундаментальную частоту следования импульсов (до 250 МГц в коммерческих моделях) за счёт малой оптической длины, а также большой динамический диапазон и высокое быстродействие её подстройки в результате совместного применения пьезотранслятора и электрооптического модулятора в линейной части резонатора. Линейная часть резонатора допускает также интеграцию регулируемых дисперсионных клиньев. К недостаткам данной топологии можно отнести необходимость использования целого ряда прецизионно-юстируемых дискретных оптических элементов, что усложняет конструкцию и предъявляет высокие требования к её механической стабильности. Подобная линейно-кольцевая топология резонатора регулируемой длины также может быть реализована с использованием волоконного циркулятора [52].

Недавно была предложена альтернативная топология резонатора ВЛСМИ, который, как и σ -резонатор, может иметь малую оптическую длину и допускает её динамическую подстройку. При этом резонатор содержит всего один дискретный оптический элемент, требующий прецизионной юстировки. В основе предложенной каплеобразной топологии резонатора [53], схематично изображенного на рис.2,*б*, лежит интегральный двухволоконный коллиматор излучения (ДКИ). Его конструкция позволяет извлекать излучение из обоих волоконных портов в виде пучков, пересекающихся вблизи точки фокуса коллимирующей линзы. Соответственно с помощью зеркала, установленного вблизи этой точки, излучение из одного волоконного порта ДКИ может быть перенаправлено в другой. Таким образом, с помощью ДКИ цельноволоконная кольцевая топология резонатора может быть трансформирована в каплеобразную топологию, позволяющую осуществлять динамическую подстройку оптической длины резонатора за счёт небольшого перемещения зеркала вблизи точки фокуса ДКИ. Кроме того, предложенная конфигурация допускает установку компактного электрооптического модулятора между ДКИ и зеркалом для увеличения быстродействия подстройки.

В последнее время в метрологических фемтосекундных волоконных лазерных системах внедряются ВЛСМИ, топология резонаторов которых обозначается как «фигура-9» [54–56]. Данный тип резонатора является усовершенствованной модификацией ранее широко распространённой топологии «фигура-8» [57–59]. Синхронизация мод в обоих типах резонаторов осуществляется за счёт искусственного насыщающегося поглотителя, который формируется нелинейным усиливающим петлевым зеркалом (НУПЗ). Важным преимуществом использования НУПЗ перед синхронизацией мод за счёт НЭПИ является возможность реализации ВЛСМИ полностью на основе

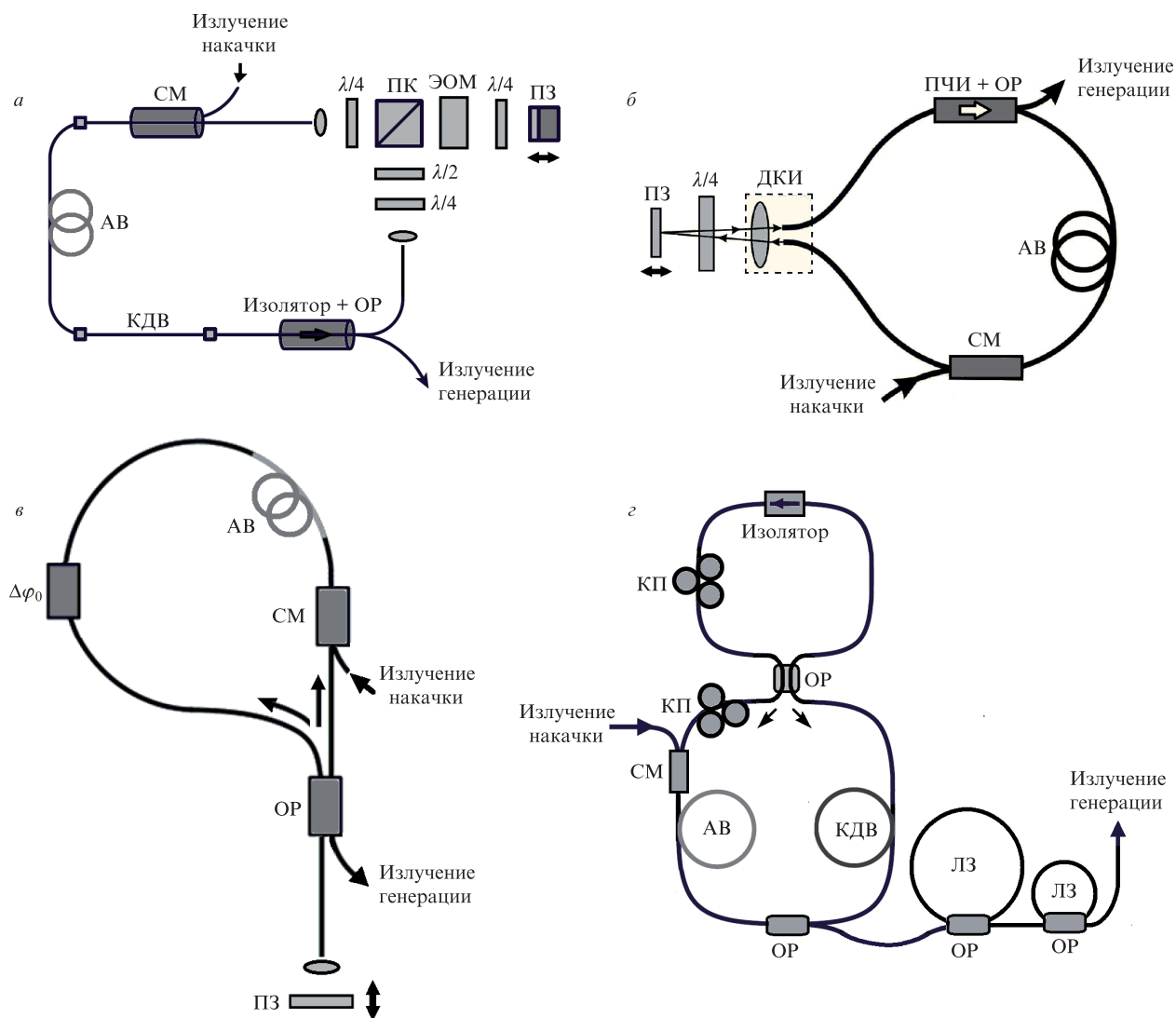


Рис.2. Схемы ВЛСМИ с различными топологиями резонаторов, обеспечивающими возможность контроля и стабилизации частотно-временных характеристик излучения: *a* – σ -резонатор [51]; *b* – каплеобразный резонатор [53]; *в* – резонатор типа «фигура-9» [54, 56]; *г* – резонатор типа «фигура-8» с дополнительными пассивными кольцами для увеличения частоты следования импульсов [57]. Обозначения: КДВ – компенсирующее дисперсию волокно, ПК – поляризационный кубик, ЭОМ – электрооптический модулятор, $\lambda/2$ и $\lambda/4$ – фазовые пластинки, ПЗ – плотное зеркало, ДКИ – двухволоконный коллиматор излучения, ПЧИ – поляризационно-чувствительный изолятор, $\Delta\varphi_0$ – начальное смещение фазы, ЛЗ – линия задержки (остальные обозначения те же, что и для рис. 1).

волокон с сохранением поляризации без применения юстируемых фазовых пластинок или контроллеров поляризации [54, 56]. Таким образом можно реализовать устойчивый к внешним воздействиям фемтосекундный генератор, не требующий периодической юстировки для запуска синхронизации мод. При этом лазеры с резонатором типа «фигура-9» по сравнению с «фигурой-8» имеют меньшую оптическую длину, что позволяет получать в них более высокую фундаментальную частоту следования фемтосекундных импульсов, вплоть до 250 МГц [56]. Линейная часть резонаторов «фигура-9» в метрологических ВЛСМИ реализуется с использованием дискретных оптических элементов для минимизации оптической длины и возможности её подстройки [54, 56]. Несмотря на наличие дискретных элементов, их юстировка не оказывает столь критичного влияния на режим синхронизации мод, как в случае классических σ -резонаторов с синхронизацией мод за счёт эффекта НЭПИ. На рис.2,в схематично изображен ВЛСМИ с топологией «фигура-9» [54], а на рис.2,г – с расширенной топологией «фигура-8», допол-

ненной пассивными кольцами для увеличения частоты следования импульсов [57]. Нужно также отметить недавно продемонстрированное усовершенствование конфигурации НУПЗ для ВЛСМИ с топологией «фигура-8» на основе волокон с сохранением поляризации [60, 61]. В новой конфигурации НУПЗ используются две отдельно управляемые волоконно-оптические секции усиления. Это расширяет возможности регулирования и оптимизации параметров импульсной генерации, в частности позволяет в широких пределах варьировать пиковую мощность импульсов.

4. Заключение

Современные топологические структуры резонаторов ВЛСМИ отличаются большим разнообразием, позволяя использовать уникальные комбинации свойств волоконных резонаторов разных типов. Бурное развитие волоконных технологий позволяет создавать принципиально новые схемы волоконных резонаторов, которые способ-

ны обеспечивать достижение рекордных параметров и более высокого качества генерации в режиме синхронизации мод, а также предоставлять расширенные возможности контроля и управления характеристиками ВЛСМИ. Результаты настоящей работы позволяют рассматривать топологический инжиниринг волоконных лазеров с синхронизацией мод излучения в качестве новой, быстро развивающейся перспективной области исследований и разработок.

С.М.Кобцев благодарит Российский научный фонд за поддержку (грант № 17-12-01281).

1. Kutz J.N. *SIAM Rev.*, **48**, 629 (2006).
2. Grelu P., Akhmediev N. *Nat. Photon.*, **6**, 84 (2012).
3. Fermann M.E., Hartl I. *Nat. Photon.*, **7**, 868 (2013).
4. Brida D., Krauss G., Sell A., Leitenstorfer A. *Laser Photon. Rev.*, **8**, 409 (2014).
5. Kim J., Song Y. *Adv. Opt. Photon.*, **8**, 465 (2016).
6. Adel P. *Pulsed Fiber Lasers* (Gottingen: Cuvillier Verlag, 2004).
7. Fermann M.E., Hartl I. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 191 (2009).
8. Paul M.C. (Ed.) *Fiber Lasers: Advances in Research and Applications* (New York: Nova Science Publ., 2017).
9. Zhou P., Wang X., Xiao H., Ma Y., Chen J. *Laser Phys.*, **22**, 823 (2012).
10. Dong L., Samson B. *Fiber Lasers: Basics, Technology, and Applications* (Boca Raton: CRC Press, 2016). ISBN-10: 1498725546/ISBN-13: 978-1498725545.
11. Shtyrina O.V., Yartukina I.A., Skidin A., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *IEEE Photon. J.*, **7**, 1501207 (2015).
12. Liu J., Wang Q., Wang P. *Opt. Express*, **20**, 22442 (2012).
13. Litago I.A., Leandro D., Quintela M.A., Pérez-Herrera R.A., López-Amo M., López-Higuera J.M. *J. Lightwave Technol.*, **35**, 5003 (2017).
14. Lau K.Y., Ng E.K., Abu Bakar M.H., Abas A.F., Alresheedi M.T., Yusoff Z., Mahdi M.A. *Opt. Laser Technol.*, **102**, 240 (2018).
15. Hekmat M.J., Gholami A., Omoomi M., Abdollahi M., Bagheri A., Normohammadi H., Kanani M., Ebrahimi A. *Laser Phys. Lett.*, **15**, 025101 (2018).
16. Han X.X. *Laser Phys.*, **25**, 025104 (2015).
17. Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S., Fedotov Y. *Proc. SPIE*, **7580**, 758023 (2010).
18. Wang P., Tang Y., Peng H., Shi G., He T., Li H., Liu Y. *J. Mod. Opt.*, **64**, 122 (2017).
19. Chernysheva M., Rozhin A., Fedotov Y., Mou C., Arif R., Kobtsev S.M., Dianov E.M., Turitsyn S.K. *Nanophotonics*, **6**, 1 (2017).
20. Mao D., Wang Y., Ma C., Han L., Jiang B., Gan X., Hua S., Zhang W., Mei T., Zhao J. *Sci. Rep.*, **5**, 7965 (2015).
21. Lee J., Koo J., Jhon Y.M., Lee J.H. *Opt. Express*, **22**, 6165 (2014).
22. Matsas V.J., Newson T.P., Richardson D.J., Payne D.N. *Electron. Lett.*, **28**, 1391 (1992).
23. Doran N.J., Wood D. *Opt. Lett.*, **13**, 56 (1988).
24. Fermann M.E., Haberl F., Hofer M., Hochreiter H. *Opt. Lett.*, **15**, 752 (1990).
25. Kobtsev S., Ivanenko A., Gladush Y.G., Nyushkov B., Kokhanovskiy A., Anisimov A.S., Nasibulin A.G. *Opt. Express*, **24**, 28768 (2016).
26. Zhang Z., Mou C., Yan Z., Zhou K., Zhang L., Turitsyn S. *Opt. Express*, **21**, 28297 (2013).
27. Mortag D., Wandt D., Morgner U., Kracht D., Neumann J. *Opt. Express*, **19**, 546 (2011).
28. Kieu K., Renninger W.H., Chong A., Wise F.W. *Opt. Lett.*, **34**, 593 (2009).
29. Wise F.W., Chong A., Renninger W.H. *Laser Photon. Rev.*, **2**, 58 (2008).
30. Kobtsev S., Kukarin S., Fedotov Y. *Opt. Express*, **16**, 21936 (2008).
31. Nyushkov B.N., Denisov V.I., Kobtsev S.M., Pivtsov V.S., Kolyada N.A., Ivanenko A.V., Turitsyn S.K. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 661 (2010).
32. Ivanenko A., Kobtsev S., Smirnov S., Kemmer A. *Opt. Express*, **24**, 6650 (2016).
33. Smirnov S., Kobtsev S., Kukarin S., Ivanenko A. *Opt. Express*, **20**, 27447 (2012).
34. Kobtsev S., Kukarin S., Smirnov S., Turitsyn S., Latkin A. *Opt. Express*, **17**, 20707 (2009).
35. Woodward R.I., Kelleher E.J.R., Runcorn T.H., Loranger S., Popa D., Wittwer V.J., Ferrari A.C., Popov S.V., Kashyap R., Taylor J.R. *Opt. Lett.*, **40**, 387 (2015).
36. Ivanenko A., Turitsyn S., Kobtsev S., Dubov M. *36th European Conf. Exhibition on Optical Communication (ECOC 2010)* (Torino, Italy, 2010, Tu.5.D.1).
37. Senoo Y., Nishizawa N., Sakakibara Y., Sumimura K., Itoga E., Kataura H., Itoh K. *Opt. Express*, **18**, 20673 (2010).
38. Денисов В.И., Нюшков Б.Н., Пивцов В.С. *Квантовая электроника*, **40**, 25 (2010) [*Quantum Electron.*, **40**, 25 (2010)].
39. Nyushkov B.N., Ivanenko A.V., Kobtsev S.M., Turitsyn S.K., Mou C., Zhang L., Denisov V.I., Pivtsov V.S. *Laser Phys. Lett.*, **9**, 59 (2012).
40. Brahm F.B., Semaan G., Niang A., Komarov A., Bahloul F., Salhi M., Komarov K., Sanchez F. *Laser Phys. Lett.*, **15**, 095401 (2018).
41. Bednyakova A.E., Babin S.A., Kharenko D.S., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., Kalashnikov V.L., Apolonski A. *Opt. Express*, **21**, 20556 (2013).
42. Kharenko D.S., Gonta V.A., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 025107 (2016).
43. Szczepanek J., Kardaš T.M., Radzewicz C., Stepanenko Y. *Opt. Lett.*, **42**, 575 (2017).
44. Szczepanek J., Kardaš T.M., Radzewicz C., Stepanenko Y. *Opt. Express*, **26**, 13590 (2018).
45. Zhou J., Pan W., Gu X., Zhang L., Feng Y. *Opt. Express*, **26**, 4166 (2018).
46. Ye J., Cundiff S.T. (Eds). *Femtosecond Optical Frequency Comb Technology: Principle, Operation and Application* (New York: Springer, 2005).
47. Beverini N., Carelli G., De Michele A., Maccioni E., Nyushkov B., Sorrentino F., Moretti A. *Opt. Lett.*, **30**, 32 (2005).
48. Droste S., Ycas G., Washburn B.R., Coddington I., Newbury N.R. *Nanophotonics*, **5**, 196 (2016).
49. Пивцов В.С., Нюшков Б.Н., Корель И.И., Коляда Н.А., Фарносов С.А., Денисов В.И. *Квантовая электроника*, **44**, 507 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 507 (2014)].
50. Gubin M.A., Kireev A.N., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Shelkovich A.S., Tausenev A.V., Tyurikov D.A. *Appl. Phys. B*, **95**, 661 (2009).
51. Нюшков Б.Н., Пивцов В.С., Коляда Н.А., Каплун А.Б., Мешалкин А.Б. *Квантовая электроника*, **45**, 486 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 486 (2015)].
52. Денисов В.И., Иваненко А.В., Нюшков Б.Н., Пивцов В.С. *Квантовая электроника*, **38**, 801 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 801 (2008)].
53. Nyushkov B.N., Kobtsev S.M., Koliada N.A., Antropov A.A., Pivtsov V.S., Yakovlev A.V. *Laser Phys. Lett.*, **14**, 115101 (2017).
54. Kuse N., Jiang J., Lee C.-C., Schibli T.R., Fermann M.E. *Opt. Express*, **24**, 3095 (2016).
55. Krzempek K., Sotor J., Abramski K. *Opt. Lett.*, **41**, 4995 (2016).
56. Hänsel W., Hoogland H., Giunta M., Schmid S., Steinmetz T., Doubek R., Mayer P., Dobner S., Cleff C., Fischer M., Holzwarth R. *Appl. Phys. B*, **123**, 41 (2017).
57. Zhao Y., Min S., Wang H., Fleming S. *Opt. Express*, **14**, 10475 (2006).
58. Wang S.K., Ning Q.Y., Luo A.P., Lin Z.B., Luo Z.C., Xu W.C. *Opt. Express*, **21**, 2402 (2013).
59. Pottiez O., Grajales-Coutiño R., Ibarra-Escamilla B., Kuzin E.A., Hernández-García J.C. *Appl. Opt.*, **50**, E24 (2011).
60. Smirnov S., Kobtsev S., Ivanenko A., Kokhanovskiy A., Kemmer A., Gervaziev M. *Opt. Lett.*, **42**, 1732 (2017).
61. Kokhanovskiy A., Kobtsev S., Ivanenko A., Smirnov S. *Laser Phys. Lett.*, **15**, 125101 (2018).